

probabilités d'interaction de l'axion et du photon correspondant au modèle KSVZ, pour lequel le couplage de l'axion aux photons est 2,7 fois plus intense que dans le modèle DFSZ. Cependant, grâce aux améliorations du dispositif, pour la première fois, les chercheurs ont pu exclure des axions du modèle DFSZ pour des masses comprises entre 2,66 et 2,81 microélectronvolts. Cet intervalle de masse semble modeste, mais il illustre les capacités d'ADMX et nous encourage à poursuivre sur cette voie.

Avec l'expérience ADMX, nous sondons désormais les masses les plus plausibles pour l'axion

L'expérience ADMX est constituée de nombreux systèmes complexes qui doivent fonctionner de concert, mais la plupart de ses éléments sont maintenant au point et leur fiabilité est confirmée. Au-delà de l'aspect technique de l'expérience, la collaboration a aussi connu des changements, elle s'est élargie et inclut désormais des physiciens de nombreux laboratoires et universités. Et une nouvelle équipe de direction d'ADMX a émergé, avec comme porte-parole Gray Rybka, de l'université de Washington, et Gianpaolo Carosi, du laboratoire Lawrence Livermore.

Nous sondons désormais la plage de masses la plus plausible pour les axions candidats à la matière noire, mais la nature peut toujours nous surprendre. Rechercher dans une plage de masses légèrement plus faibles n'est pas très compliqué; en revanche, adapter notre expérience pour rechercher des masses supérieures est un défi de taille.

Quand la masse des axions augmente, la fréquence de résonance de la cavité doit aussi augmenter. Cela implique de diminuer le diamètre de la cavité, ce qui réduit d'autant le volume dans lequel on peut rechercher les axions. Nous pourrions entasser un grand nombre de cavités à l'intérieur d'un unique gros aimant pour conserver un volume appréciable, mais nous serions alors confrontés au «problème de la montre suisse»: la complexité d'un tel système devient très difficile à gérer. Nous

pourrions aussi nous contenter d'une petite cavité, à condition d'augmenter l'intensité du champ magnétique pour compenser. Cette solution est coûteuse, mais elle est actuellement à l'étude. Il est possible que d'ici cinq à dix ans, une intensité accrue du champ magnétique (jusqu'à 32, voire 40 teslas) élargira la plage des masses de notre recherche.

Pour des masses de l'axion beaucoup plus grandes (proches de un milliélectronvolt), les astrophysiciens auraient les moyens de contribuer à la traque. Si de tels axions existent et forment des halos de matière noire autour des galaxies, les radiotélescopes pourraient détecter des raies d'émission très faibles.

À terme, ADMX et d'autres projets parviendront à explorer l'intégralité de la fenêtre théorique des masses possibles de l'axion candidat à la matière noire. Le fait que la plage des masses plausibles soit limitée et entièrement accessible par des expériences fait de l'axion un candidat attrayant, par rapport à d'autres possibilités impossibles à tester complètement.

LA TRACE DES AXIONS DANS LA STRUCTURE DE L'UNIVERS?

Tandis que nos travaux expérimentaux se poursuivent, les théoriciens font eux aussi des progrès. Des modèles cosmologiques complexes simulés sur des supercalculateurs sont en passe de produire des prédictions plus fiables pour la masse de l'axion. Il est possible, par exemple, que les axions se soient accumulés au cours de l'histoire de l'Univers, sous l'effet de la gravité, selon une distribution différente de celle des wimps. Cela aurait des conséquences sur l'histoire de la formation des grandes structures cosmiques. Des programmes d'observations astrophysiques à venir, comme le LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*, grand télescope d'étude synoptique) qui sera opérationnel en 2019, établiront des cartes de la structure à grande échelle de l'Univers avec une précision suffisante pour permettre aux chercheurs de faire le tri entre les divers candidats à la matière noire.

Une autre possibilité encore est que les axions prédits par la chromodynamique quantique ne soient que la manifestation d'une théorie plus fondamentale œuvrant aux échelles énergétiques les plus hautes. L'une de ces théories en lice, la théorie des cordes, prédit des axions de masse beaucoup plus petite que celles qu'explore l'expérience ADMX. Mais la théorie des cordes est hautement spéculative, tout comme ses prédictions.

Il y a vingt ans, le consensus confortable était que la matière noire était constituée de wimps. Ces dernières années, les axions ont gagné en crédibilité. Dans un avenir pas trop lointain, nous devrions savoir si, oui ou non, ils sont la solution au mystère de la face invisible du cosmos. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Du et al., **Search for invisible axion dark matter with the Axion Dark Matter Experiment**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, article 151301, 2018.

P. Sikivie, **Axions, domain walls, and the early Universe**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 48, pp. 1156-1159, 1982.

S. Weinberg, **A new light boson ?**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, pp. 223-226, 1978.

F. Wilczek, **Problem of strong P and T invariance in the presence of instantons**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, pp. 279-282, 1978.

Bientôt des mines

L'ESSENTIEL

> La demande en certains métaux augmente et les gisements terrestres s'épuisent, d'où l'idée d'exploiter ceux des grands fonds marins.

> À plus de 4 000 mètres de profondeur, sur le fond des océans, il existe d'immenses champs de nodules polymétalliques contenant des proportions importantes de nickel, de cuivre et de cobalt.

> L'utilisation de machines pour les ramasser disperserait des masses de sédiments en tous sens. Les navires d'exploitation feraient de même en surface après avoir trié le matériel dragué.

> Dès lors, avant que ne démarre cette nouvelle activité industrielle, il importe d'étudier comment minimiser son impact environnemental.

LES AUTEURS



THOMAS PEACOCK
professeur de génie mécanique à l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), aux États-Unis



MATTHEW H. ALFORD
professeur d'océanographie physique à l'institut Scripps, aux États-Unis

Les grands fonds océaniques comportent de riches gisements de métaux. Mais leur exploitation, qui pourrait démarrer prochainement, aura des impacts environnementaux négatifs. Scientifiques et organismes régulateurs recherchent des solutions pour limiter les dégâts.

Février 2018, à 50 kilomètres au large de San Diego. Le navire océanographique *Sally Ride* flotte sur 1 000 mètres d'eau. À son bord, huit conteneurs grands comme une voiture familiale sont remplis de sédiments dragués au fond du Pacifique. Nous sommes en train de les mélanger avec de l'eau de mer dans un énorme réservoir. Puis nous ferons passer le contenu par une conduite d'évacuation plongeant depuis notre

bord jusqu'à 60 mètres sous la surface. L'objectif est de décrire la dynamique du nuage de boue créé. À l'aide de tout un réseau de capteurs reliés au navire, nous allons mesurer sa forme et suivre son évolution; nous mesurerons la concentration des particules de sédiment dans la colonne d'eau. Les données recueillies nous aideront à nourrir une réflexion générale sur l'exploitation minière en mer, une nouvelle industrie qui pourrait bientôt avoir un impact important sur l'océan.



au fond des océans?



Les grands fonds sont parfois tapissés de nodules polymétalliques. Ils abritent des formes de vie fragiles, comme ce gros poisson à croissance très lente.

Après des années d'essais, plusieurs États et entreprises commencent à prospecter les grands fonds marins à la recherche de nickel, de cuivre, de cobalt et d'autres métaux de valeur. Il existe plusieurs types de gisement, mais les plus intéressants à exploiter consistent en accumulations, à plusieurs milliers de mètres de profondeur, de concrétions rocheuses riches en métaux de la taille du poing : des nodules polymétalliques.

Pour les récolter, les industriels veulent construire des machines capables de travailler à ces profondeurs. Ces machines collectrices avanceraient lentement sur le plancher océanique en aspirant la couche supérieure qui contient les nodules, opération qui s'accompagnerait du relargage vers l'arrière d'un important nuage de sédiments. Elles remonteraient les nodules sur de grands navires par des tuyaux de plusieurs kilomètres de long. En triant le matériel prélevé, on obtiendrait des millions de nodules par jour. Les sédiments restants seraient renvoyés dans la mer où ils formeraient cette fois un nuage plongeant.

Quel impact une activité d'extraction ainsi menée aura-t-elle sur les organismes vivant sur le plancher océanique et dans la colonne d'eau ? L'expérience de pollution volontaire décrite plus haut vise à apporter des éléments de réponse à cette question.

UNE DEMANDE CROISSANTE EN NICKEL, CUIVRE ET COBALT

Les mines terrestres à fortes teneurs commencent à s'épuiser. Dans le même temps, l'augmentation de la population mondiale, l'urbanisation, la croissance de la consommation mondiale et le développement rapide de technologies dépendant de certains métaux tirent les prévisions de marchés futurs vers le haut.

On estime par exemple que la demande mondiale de nickel – environ 2 millions de tonnes actuellement – devrait augmenter de moitié d'ici à 2030. Et les gisements terrestres en contiendraient encore environ 76 millions de tonnes de nickel. Or, à elle seule, la zone de fracture de Clarion-Clipperton, c'est-à-dire la plaine abyssale s'étendant de Hawaï à la Basse-Californie, en contient à peu près autant ! Pour le cobalt, la situation est similaire : les réserves terrestres sont évaluées à environ 7 millions de tonnes, mais les nodules de cette même zone de fracture en contiennent autant ou plus. C'est pourquoi plusieurs entreprises, telles que la GSR (la société belge Global Sea Mineral Resources) ou la société anglaise UK Seabed Resources, se tournent vers l'exploitation minière en mer profonde, qu'elles espèrent moins coûteuse à terme.

Du reste, certains pays disposant de peu de ressources minérales terrestres, comme le Japon et la Corée du Sud, veulent déjà prospecter les

océans à la recherche de gisements. Ils ont donc commencé par explorer leur zone économique exclusive (ZEE). En septembre 2017, la Jomgme (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) a ainsi effectué dans ces eaux territoriales l'un des premiers essais à grande échelle. Une excavatrice prototype a récolté des tonnes de zinc et d'autres métaux en plusieurs endroits situés à 1600 mètres de profondeur, au large d'Okinawa.

De petites nations insulaires, comme les Tonga et les Îles Cook, ont des ressources trop limitées pour développer elles-mêmes une telle industrie. Elles négocient donc des droits d'exploitation minière à l'intérieur de leurs zones économiques exclusives. S'agissant du plancher océanique sous-jacent aux eaux internationales, c'est l'Autorité internationale des fonds marins, ou AIFM (sigle anglais : ISA), communément appelée l'« Autorité », qui l'administre depuis Kingston, en Jamaïque. Pour le moment, l'Autorité a accordé 28 permis d'exploration à des organismes de 20 pays.

Pendant que les entreprises prospectent les ressources, les chercheurs s'efforcent d'en savoir le plus possible sur les éventuels effets destructeurs de la nouvelle industrie et de déterminer dans quelle mesure on pourrait les réduire. Des gouvernements, des industriels, l'AIFM, des universités et des organismes scientifiques (en France, l'Ifremer et le CNRS) s'associent afin de lancer et de mener les projets de recherche nécessaires.

Trois types de gisement sont prometteurs. Le premier est celui des « amas sulfurés ». Il s'agit d'accumulations de sulfures métalliques (FeS_2 , PbS , Au_2S_3 ...) créées par les sources hydrothermales présentes sur les dorsales océaniques, ces longues chaînes volcaniques sous-marines qui marquent la frontière entre deux plaques tectoniques. Les amas sulfurés contiennent des masses notables de zinc, de plomb et d'or. La Papouasie-Nouvelle-Guinée a accordé à la société canadienne Nautilus

La plupart des projets d'extraction en eau profonde concernent les nodules polymétalliques